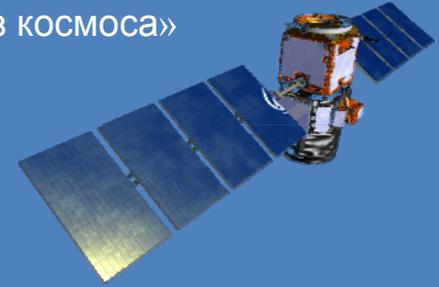


XX Международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
14 – 18 ноября 2022 г., г. Москва

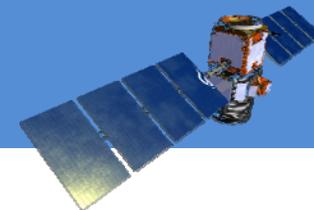


**Моделирование эхо-сигнала моностатического лидара  
спутникового базирования от перистых облаков с учетом  
многократного рассеяния лазерного излучения**

Т.В. Русскова, В.А. Шишко

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, г. Томск

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-27-00719)

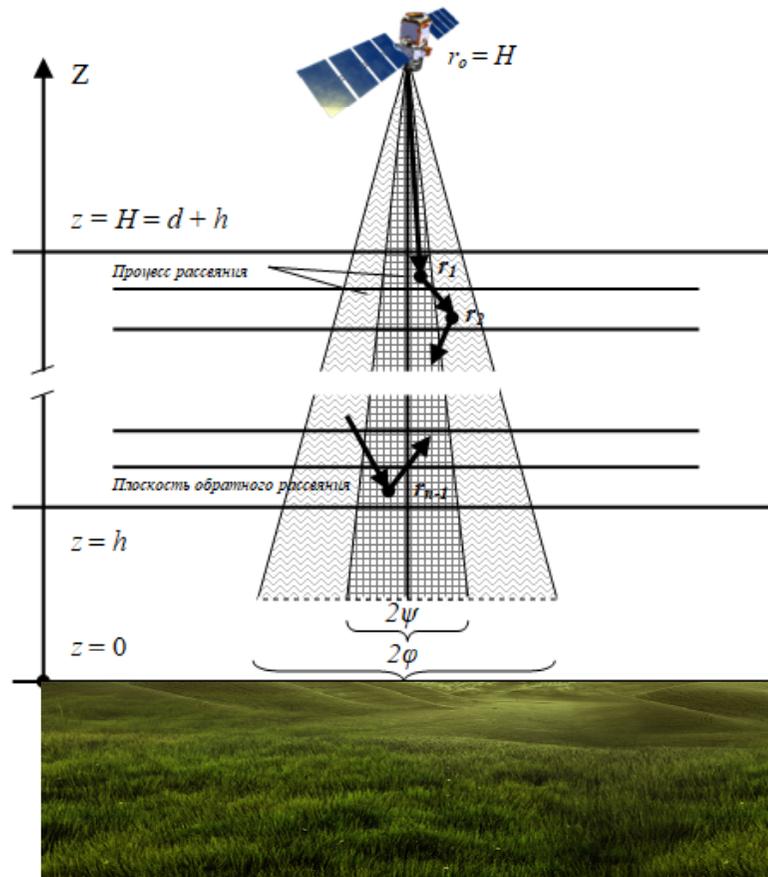


- широкий спектр лидарных систем, разработанных для решения задач физики и оптики атмосферы, свидетельствует об их эффективности: по сравнению с пассивными оптическими и активными радиолокационными приборами лидарные системы обеспечивают существенно более точными данными без использования естественных источников света с большим пространственным разрешением
- несмотря на большое количество инструментов, позволяющих проводить наблюдения за перистыми облаками, проблема интерпретации получаемых данных до сих пор стоит весьма остро
- известно, что лидарный сигнал претерпевает изменения, обусловленные взаимодействием излучения с рассеивающей средой; степень воздействия среды на эхо-сигнал зависит от условий его распространения: в оптически плотной среде сигнал рассеивается многократно
- пренебрежение многократным рассеянием при интерпретации лидарных сигналов может повлечь за собой искажение результатов зондирования; границы применимости предлагаемых методик коррекции эхо-сигнала от 'помех' многократного рассеяния не всегда ясны, а значит необходимы новые методики интерпретации измерений с учетом многократного рассеяния

**Цель исследования: определить чувствительность уровня фона многократного рассеяния к оптико-микрофизическим характеристикам перистых облаков и параметрам лидарной системы спутникового базирования**

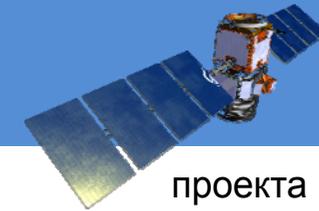
# Численная модель MSLRS

Для моделирования переноса лидарного сигнала в облачной атмосфере с учетом многократного рассеяния разработана численная модель **MSLRS** (**M**ultiple **S**cattered **L**idar **R**eturn **S**imulator); модель позволяет получать распределение по времени  $t$  суммарного эхо-сигнала и его компонентов, сформированных разными кратностями рассеяния



- рассматривается плоскопараллельная вертикально неоднородная среда
- предполагается моностатическая система оптического излучения
- нестационарное уравнение переноса решается методом Монте-Карло (алгоритмы простой и двойной локальной оценки)
- включена возможность получения аналитических оценок мощности светового сигнала в приближении однократного и двукратного рассеяния

# Тестирование модели MSLRS



4

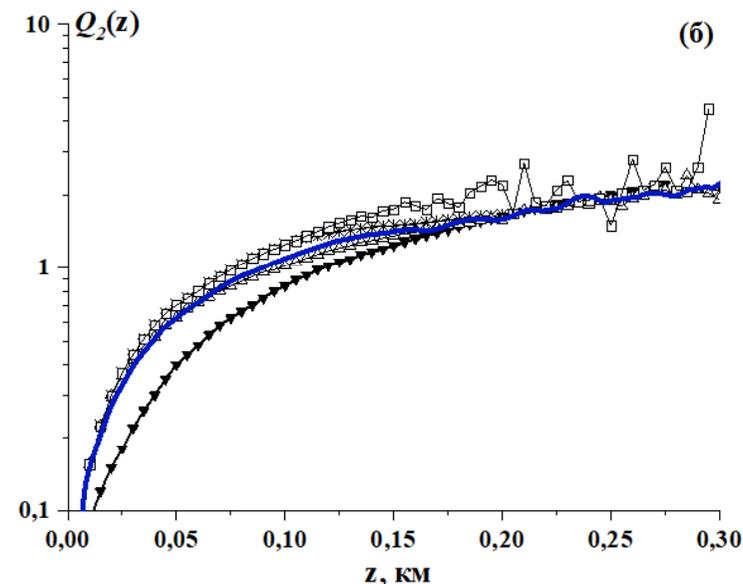
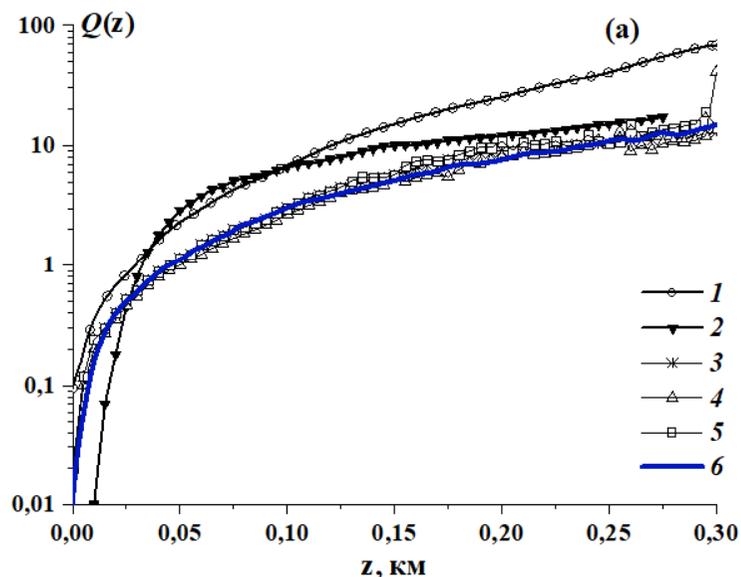
Численная модель протестирована с использованием данных международного

проекта

## MUSCLE (MULTiple SCattering Lidar Experiments)

- изотропная среда с рассеивающим облачным слоем С1 (Д. Дейрменджан) высотой 300 м
- оптическая толщина слоя 5.175
- спектральный канал 1.064 мкм
- длительность импульса 40 нс

$Q(z) = P_{\geq 2}(z)/P_1(z)$ ,  $Q_2(z) = P_2(z)/P_1(z)$ , где  $P_i(z)$ ,  $i \geq 1$ , – мощность лидарного сигнала, формируемого излучением, рассеянным  $i$  раз



1 – аналитическая модель DREV (L. Bissonnette et al.), 2 – аналитический способ с использованием теории Ми (С. Flesia et al.), 3 – полуаналитический подход (Э.П. Зеге и др.), 4 и 5 – метод Монте-Карло (D. Winker et al.) и (P. Bruscaioni et al.) соответственно, **6 – метод Монте-Карло (MSLRS)**



**Цель:** исследование чувствительности уровня фона многократного рассеяния к оптико-микрофизическим характеристикам перистых облаков и параметрам лидарной системы с помощью разработанной модели MSLRS

Для оценки доли лазерного излучения с кратностью рассеяния выше первой в лидарном сигнале рассчитывались отношения мощностей излучения, обусловленных двукратным  $q_2$  и многократным  $q_n$ ,  $n \geq 2$ , рассеянием излучения, к суммарному эхо-сигналу

$$q_2(z) = 100\% \times P_2(z) / P(z), \quad q_n(z) = 100\% \times P_{n \geq 2}(z) / P(z)$$

## Условия численных экспериментов

- предположение об отсутствии аэрозольных частиц в подоблачном пространстве и внутри облачного слоя
- подстилающая поверхность – абсолютно черное тело
- слой перистых облаков толщиной 2 км располагается на высоте 9 км
- фазовое состояние облачности – кристаллическое, ориентация ледяных частиц в пространстве – хаотическая, эффективные диаметры частиц – 10 и 60 мкм
- спектральный канал 0.532 мкм
- радиус кругового приемника лидара 10 см
- угол расходимости источника излучения 1 мрад, длительность лазерного импульса 20 м
- энергия лидарного импульса равна 1
- амплитуда лазерного импульса имеет прямоугольную форму
- высота расположения лидара 705 км над поверхностью Земли

# Входные параметры численных экспериментов

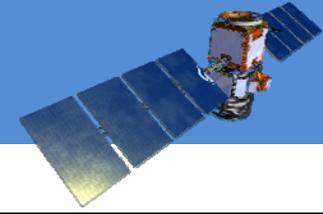


Таблица. Модели микроструктуры перистых облаков, используемые в расчетах

№	Модель микроструктуры	Источник данных	Метод расчета	Учет шероховатости поверхности $\rho$	Учет распределения по размерам
I	Частицы произвольной формы ( <b>ARB</b> )	Шишко В.А. и др., 2019	GOM, POM	Нет	Нет
II	Смесь частиц различных форм ( <b>GHM</b> )	Baum В.А. et al., 2014	ADDA, TM, IGOM	Да	Да
III	Хаотически ориентированные сплошные столбики ( <b>SC</b> )	Yang P. et al. , 2005	FDTD, TM, IGOM, LMT	Да	Нет
		Коношонкин А.В. и др., 2016	GOM, POM	Нет	Нет

POM – метод физической оптики, GOM – метод геометрической оптики, IGOM – улучшенный метод геометрической оптики, ADDA – метод дискретных диполей

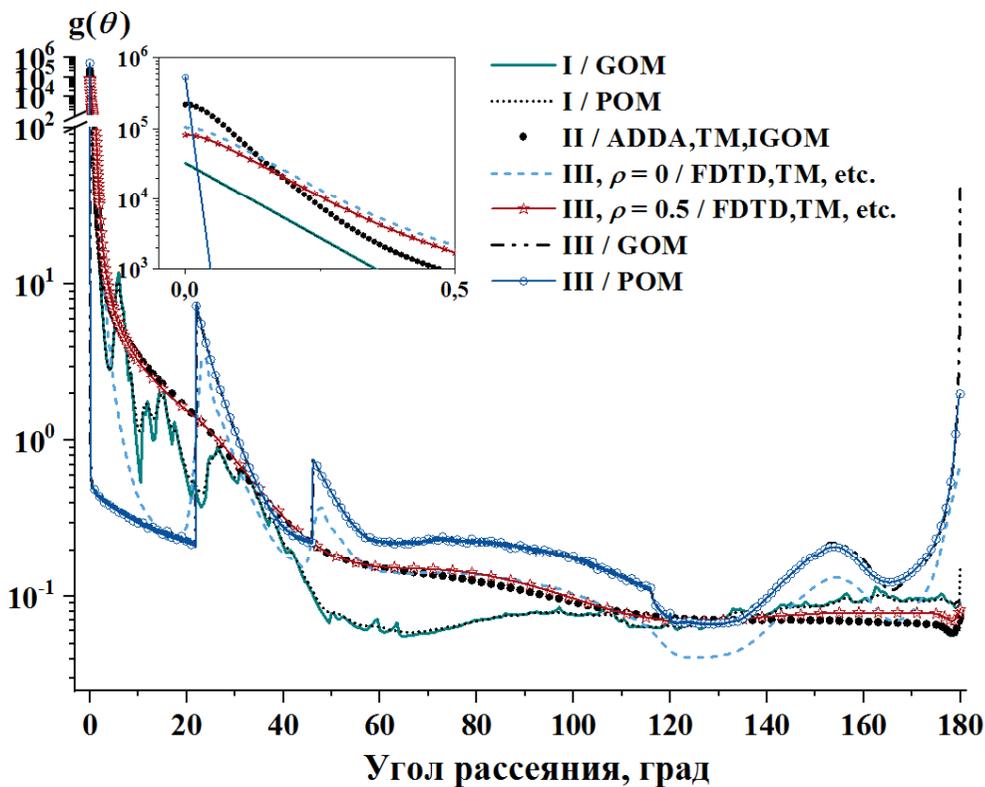
TM – метод Т-матриц, LMT – метод на основе теории Лоренца-Ми, FDTD – метод конечных разностей во временной области

- ледяные частицы являются сложным геометрическим объектом, ввиду чего до сих пор не создано единой базы данных оптических характеристик перистых облаков, охватывающей все многообразие форм, размеров и ориентаций частиц, и, в то же время, соответствующей экспериментальным наблюдениям
- имеющиеся в прямом доступе базы данных предоставляют информацию о матрицах рассеяния, рассчитанных преимущественно в приближении геометрической оптики; для некоторых из форм кристаллических частиц такой подход не позволяет описать особенности рассеяния вблизи направления назад; например, при усреднении по ориентациям кристалла для индикатрис рассеяния характерно появление сингулярности
- результаты расчетов индикатрис вблизи направления назад методами GOM и POM расходятся между собой, что, вероятно, обусловлено дифракционными или когерентными эффектами, не учитываемыми в методе GOM; в работе (С. Zhou, P. Yang, 2015) авторами признается, что используемые ими вычислительные методы (PSTD, II-TM, IGOM) не в состоянии моделировать пик интенсивности в окрестности направления рассеяния назад, поэтому пик добавляется в решение искусственно и приближенно
- для более точного решения задачи может быть использован метод физической оптики
- значимость поиска корректного решения отмечается также в работе (С.N.R. Platt, 1981), где констатируется, что многократно рассеянное излучение очень чувствительно к форме индикатрисы рассеяния вблизи направления назад

# Входные параметры численных экспериментов



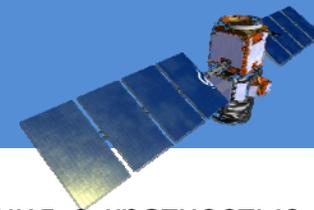
Индикатрисы однократного рассеяния, используемые в численных экспериментах, для ледяных кристаллов с  $D_e \approx 60$  мкм



I – частицы произвольной формы  
II – смесь частиц различных форм  
III – сплошные столбики  
 $\rho$  – степень шероховатости поверхности

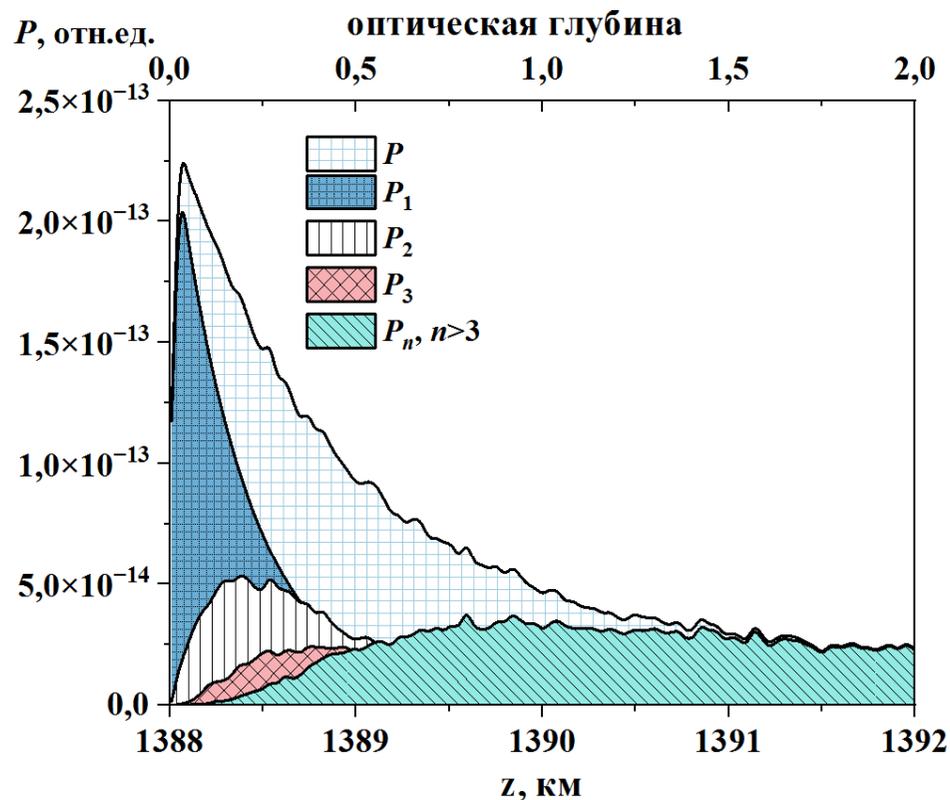
- среди представленных наиболее гладкими индикатрисами являются индикатрисы рассеяния для шероховатых столбиков и смеси частиц различных форм
- остальные индикатрисы имеют особенности рассеяния, специфические для каждой из форм кристаллов

# Результаты моделирования



8

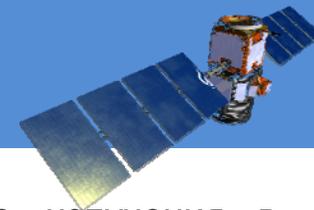
пример временной развертки мощности суммарного эхо-сигнала и вкладов излучения с кратностью рассеяния 1, 2, 3 и более 3 в зависимости от длины проникновения лазерного луча в перистое облако



- поле зрения приемника 130 мрад (CALIPSO), длительность импульса 20 нс
- эффективный диаметр частиц 60 мкм
- модель микроструктуры SC

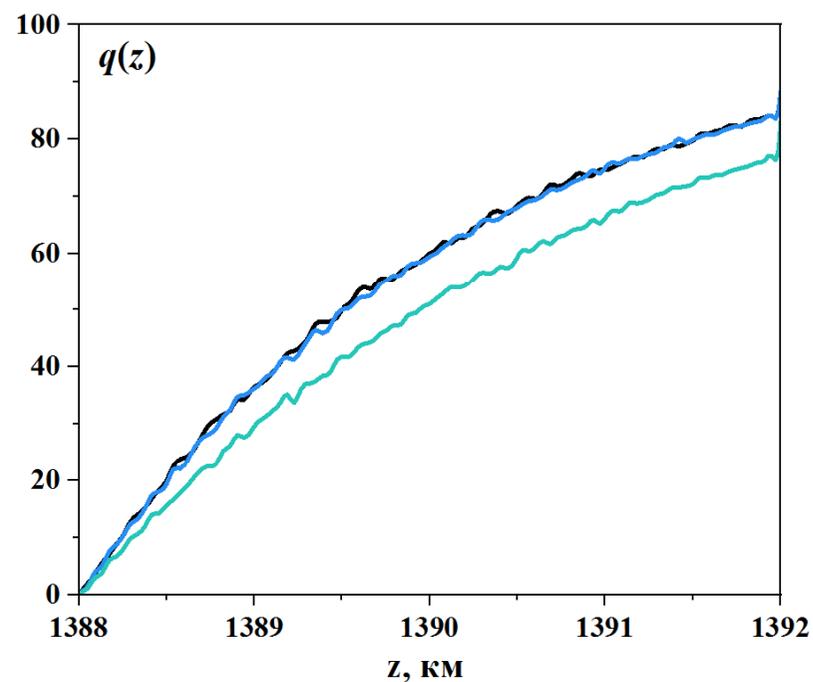
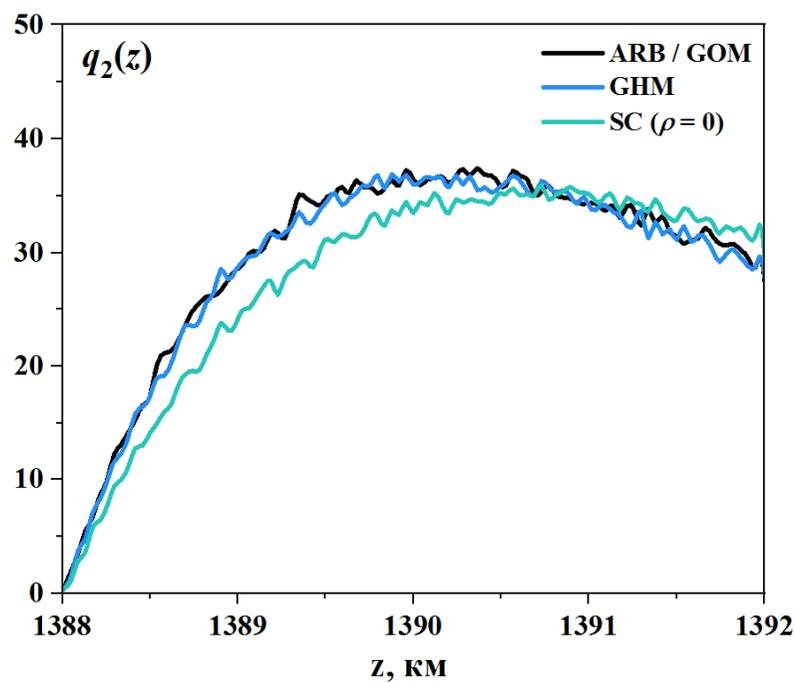
- для наглядности по оси OX отложено не время  $t$ , а расстояние, которое излучение проходит за соответствующее время; значение 1388 км – это длина пути луча света от источника до ближайшей границы облака и обратного пути до приемника,  $z = 1392$  км соответствует дальней границе облачности

# Результаты моделирования

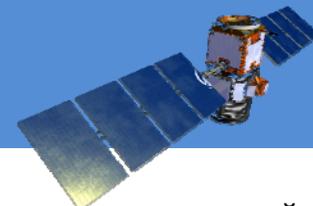


9

временная развертка оценок вкладов двукратно и многократно рассеянного излучения в суммарный эхо-сигнал для различных моделей микроструктуры ледяных частиц с эффективным диаметром 10 мкм (поле зрения приемника 10 мрад, длительность импульса 20 нс)



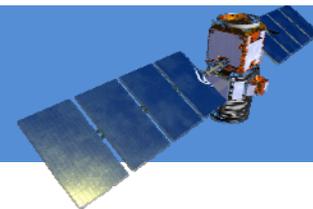
- наблюдается зависимость уровня фона многократного рассеяния от формы частиц; в частности, для модели облака, состоящего из хаотически ориентированных столбиков, доля многократного рассеяния в суммарном сигнале ниже, чем для модели, состоящей из смеси частиц разных форм; для частиц с эффективным диаметром 60 мкм имеет место аналогичный эффект



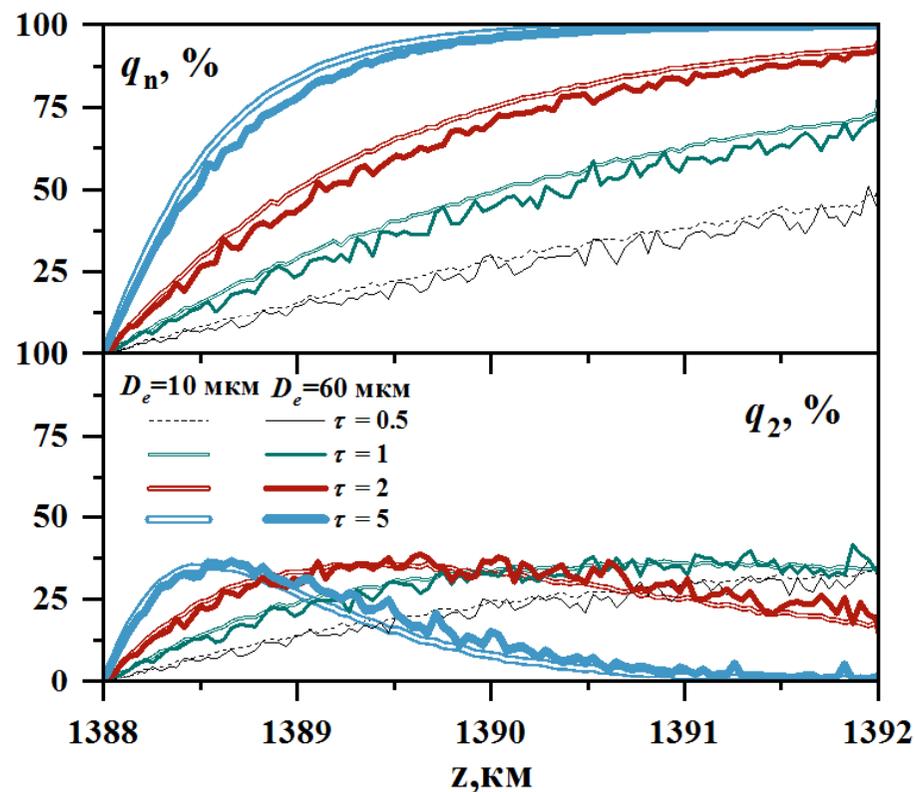
оценки вкладов кратно рассеянного излучения в суммарный эхо-сигнал для моделей микроструктуры ледяных частиц SC и ARB в зависимости от степени шероховатости кристаллов и метода расчета оптических характеристик (поле зрения приемника 10 мрад, длительность импульса 20 нс)

Модель микроструктуры	Хаотически ориентированные сплошные столбики (SC)				Частицы произвольной формы (ARB)			
	Структура поверхности частиц				Метод расчета			
Варьируемый признак	Гладкие частицы		Шероховатые частицы ( $\rho=5$ )		GOM (сингулярность в окрестности $\theta = 180^\circ$ есть)		POM (сингулярности в окрестности $\theta = 180^\circ$ нет)	
	10	60	10	60	10	60	10	60
$D_e$ , мкм	10	60	10	60	10	60	10	60
$q_1$ , %	56.2	60.4	48.8	45.4	46.4	45.1	54.0	56.5
$q_2$ , %	26.8	26.2	28.7	30.8	29.5	29.8	25.9	23.4
$q_3$ , %	11.1	9.5	13.9	14.7	15.0	15.5	12.5	12.2
$q_n, n \geq 2$ , %	43.8	39.6	51.2	54.6	53.6	54.9	46.0	43.5

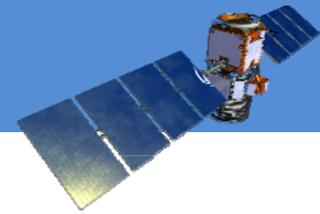
- пренебрежение шероховатостью ледяных частиц приводит к уменьшению фона многократного рассеяния
- наличие у индикатрисы сингулярности в окрестности угла рассеяния  $180^\circ$  приводит к повышению фона многократного рассеяния



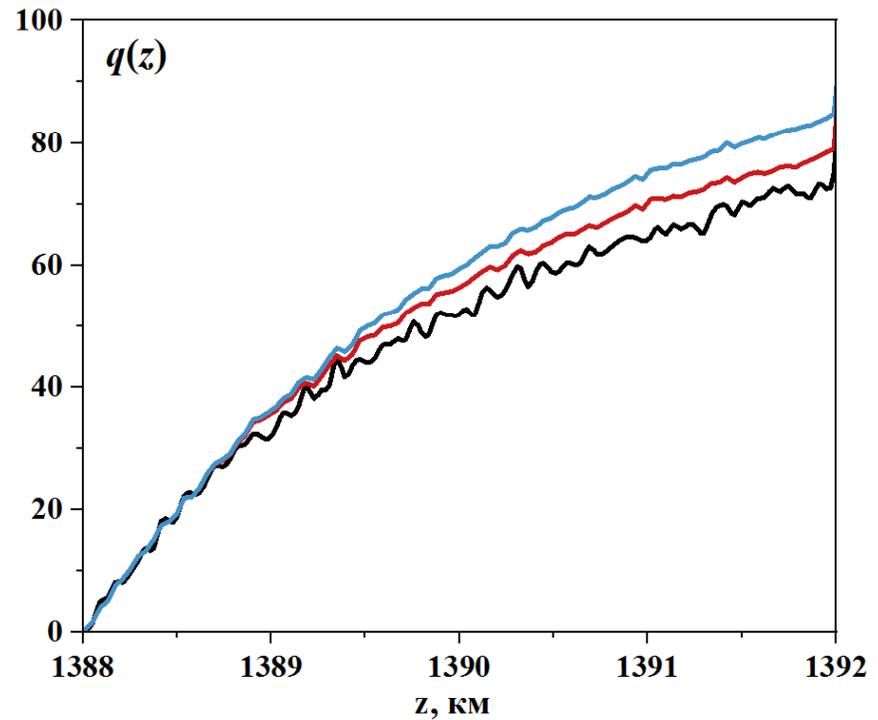
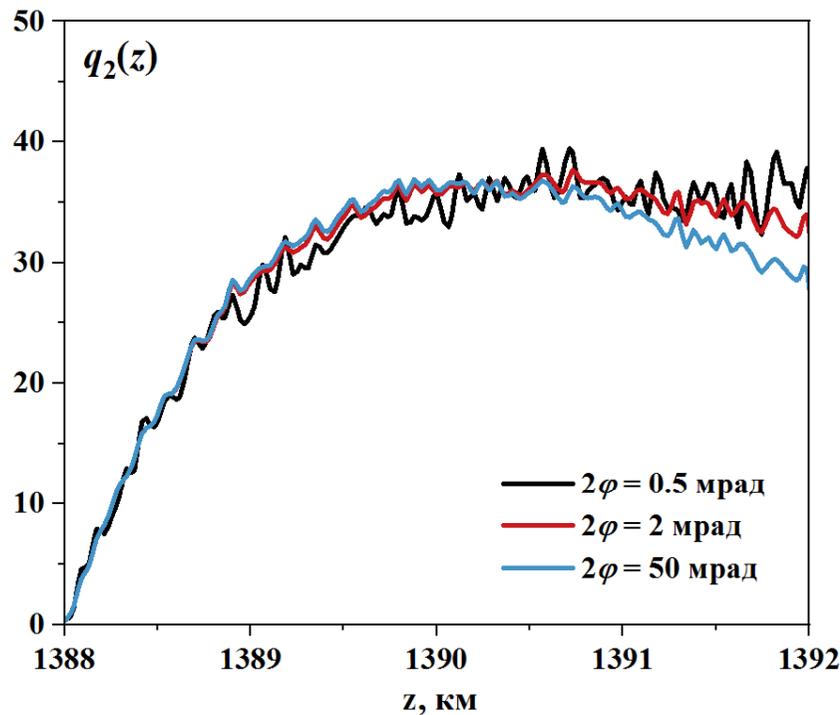
оценки вкладов двукратно и многократно рассеянного излучения в суммарный эхо-сигнал для модели SC с эффективным диаметром 10 и 60 мкм при разных значениях коэффициента ослабления ледяных кристаллов (поле зрения приемника 2 мрад)



- наблюдается сильная зависимость мощности эхо-сигнала, формируемого многократным рассеянием излучения, от оптической толщины облака



оценки вкладов двукратно и многократно рассеянного излучения в суммарный эхо-сигнал для модели GHM с  $D_e = 10$  и  $60$  мкм при разных значениях поля зрения приемника  $2\varphi$



- расширение поля зрения приемника приводит к увеличению фона многократного рассеяния преимущественно за счет высоких кратностей рассеяния; рост существенно замедляется при достижении угла поля зрения 10 мрад
- для кристаллов с эффективным диаметром 60 мкм наблюдается аналогичная картина как в качественном, так и в количественном отношении